Abschlussbericht

Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben Nr.:	1501622
Vorhabentitel:	ULTRAFOKUS
Autoren:	Christoph Büttner Stefan Buske
Dienststelle des Autors:	TU Bergakademie Freiberg Institut für Geophysik und Geoinformatik Gustav-Zeuner-Str. 12 09599 Freiberg
Berichtsdatum:	30.09.2024

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 1501622 gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

I. Kurzfassung/Abstract 2

1. Kurzfassung 2

2. Abstract 3

II. Hauptteil 3

1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm 3

2. Planung und Ablauf des Vorhabens 4

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 4

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5

5. Versuchseinrichtungen / Analytische Verfahren 5

6. Durchführung der Untersuchungen/Ablauf der Experimente bzw. Analysen 6

7. Erzielte Ergebnisse 7

8. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Forschungsgebiet 9

9. Verweis auf eigene öffentliche Berichte 9

10. Zusammenfassung 9

11. Quellen 10

I. Kurzfassung/Abstract

1. Kurzfassung

Die grundlegende Idee des Ultrafokus-Projekts liegt in der Anwendung fokussierender seismischer Abbildungsverfahren auf Ultraschallecho-Daten aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Betonkörpern mit Bezug zur kerntechnischen Sicherheit. Ziel ist es, ein höheres Auflösungsvermögen zu erreichen, um Defekte und andere Strukturen in den Betonkörpern besser identifizieren zu können. Dazu wurden existierende Abbildungsalgorithmen angepasst und erweitert. Diese wurden erfolgreich anhand synthetischer Modelle und realer Daten getestet. In allen Fällen ergibt sich durch die Anwendung der fokussierenden Migrationsverfahren ein klareres Abbild mit weniger Rauschanteil und nahezu keinen Artefakten.

2. Abstract

The basic idea of the Ultrafokus project is to apply focusing seismic imaging methods to ultrasound echo data from nondestructive testing of concrete specimen with relevance in nuclear safety. The aim is to achieve a higher resolution to identify defects and other structures within the concrete specimen more precisely. Existing imaging algorithms have been adapted and enhanced for this purpose which have been successfully tested using both, synthetic and real data sets. In all cases, the result is a clearer image with less noise and almost no artefacts.

II. Hauptteil

1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Ziel des Projekts ist die Anwendung fortschrittlicher seismischer Abbildungsverfahren auf Problemstellungen aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, insbesondere auf Ultraschallecho-Daten von Bauteilen und Probekörpern aus der Kern- und Reaktorsicherheit. Im Rahmen der „Komponentensicherheit und Qualitätssicherung“ sollen diese Verfahren dazu beitragen, genauere Aussagen zur Integrität (strukturmechanisches Verhalten, genaue Position und Ausdehnung von Rissen und Inhomogenitäten) der untersuchten Bauteile machen zu können. Da die genannten Verfahren vorrangig für die Anwendung auf seismische Problemstellungen entwickelt und implementiert wurden, ist eine umfassende Weiterentwicklung und Adaption sowie die Reimplementierung der Verfahren notwendig. Dieser Prozess sowie die sich anschließenden Tests an Probekörpern und Bauteilen sind zentrale Bestandteile des ULTRAFOKUS-Projekts.

Dieses Ziel soll mithilfe eines Arbeitsprogramms in drei Schritten erreicht werden:

1) Erstellung der Software für spätere Tests mit synthetischen und realen Daten: Hierbei steht insbesondere die Adaption vorhandener seismischer Abbildungsverfahren an die Randbedingungen der zerstörungsfreien Prüfung im Vordergrund. Die so entstandene Software soll anhand kleiner synthetischer Modelle auf ihre Funktion geprüft werden.
2) Tests mit realen Daten: Für die Entwicklung eigener Verfahren und Apparaturen hält die Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung (BAM) in Berlin Probekörper vor. Von solchen Probekörpern stehen Datensätze zur Verfügung, die zur weiteren Verifizierung der Abbildungsverfahren dienen. Dies ermöglicht außerdem einen Vergleich zu etablierten Verfahren in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP).
3) Abschließend sollen die Abbildungsverfahren an einem realen Großversuch untertage weiter getestet werden.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Projektablauf orientiert sich am Arbeitsprogramm. Demnach beginnt die Einarbeitung mit einem umfassenden Literaturstudium sowie dem vertraut machen mit bereits implementierter Software für seismische Abbildungsverfahren. Diese Vorbereitungen sind notwendig, um die Software für die Verwendung mit Ultraschallecho-Daten zu adaptieren und zu erweitern.

Anschließend sollen erste synthetische Tests innerhalb des ersten Jahres durchgeführt werden. Nachdem die grundlegende Funktion der Abbildungsverfahren erfolgreich verifiziert wurde, folgen weitere Tests an Probekörpern. Hierbei wird eine Kooperation mit der BAM nötig. Es schließt sich eine erste Publikationsphase an, in der die grundlegenden Erkenntnisse einem wissenschaftlichen Fachpublikum präsentiert werden.

Im weiteren Projektverlauf sollen die Abbildungsverfahren an Bauteilen mit Relevanz in der kerntechnischen Sicherheit getestet werden. Dazu zählen bspw. große Betonkörper, die für den Verschluss potenzieller Endlager in Frage kommen. Diese können auf Risse und Einschlüsse untersucht werden. Auch hier schließt sich ein Validierungs- und Publikationsprozess an.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Für die Abbildung des Erdinneren haben sich seismische Abbildungsverfahren bewährt. Diese werden seit Jahrzehnten entwickelt und getestet. In den vergangenen Jahren haben fokussierende Abbildungsverfahren wie die Fresnel-Volumen-Migration (Buske et al., 2009) und die Kohärenz-Migration (Hloušek et al., 2015) die Qualität und den Detailgrad seismischer Migrationsergebnisse erheblich gesteigert. Zudem haben sie sich als effizientes Werkzeug im Vergleich mit anderen fortschrittlichen Abbildungsverfahren herausgestellt. Die fokussierenden Verfahren basieren auf der sogenannten Kirchhoff-Migration (Schneider et al., 1978) und nutzen Richtungsinformationen aus dem einfallenden Wellenfeld, um eine genauere Rückprojektion der einfallenden Wellenenergie in den Untergrund zu erreichen. Das Ergebnis ist ein klareres und detaillierteres Migrationsergebnis.

Im Bereich der ZfP ist die Auswertung elastischer und akustischer Ultraschalldaten ein etabliertes Verfahren. Hierbei wird analog zu seismischen Messungen ein Quellsignal von einer Quellposition in den Untergrund emittiert. Werden Teile der Wellenenergie des Quellsignals zurück an die Oberfläche reflektiert, können diese an mehreren Empfängerpositionen aufgezeichnet werden. Die anschließende Verarbeitung der Ultraschalldaten zu einem Abbild erfolgt häufig mit Abbildungsverfahren, die in ihrem Prinzip der Kirchhoff-Migration ähneln. Diese Abbildungsverfahren sind als Total Focusing Method (TFM) oder Synthetic Aperture Focusing Method (SAFT) bekannt. Bisher erfolgt eine Fokussierung hier nur auf Basis der Skalierung von Daten, nicht aber unter Zuhilfenahme

zusätzlicher Informationen aus dem Wellenfeld, wie es bei den fokussierenden seismischen Verfahren der Fall ist.

Neben den Kirchhoff-basierten Abbildungsverfahren werden auch Methoden mit anderen Abbildungsprinzipen entwickelt. Hierbei sei die Reverse Time Migration (RTM) genannt, welche ihren Ursprung ebenfalls in der Seismik hat und in den letzten Jahren durch verschiedene internationale Forschungsgruppen auf ZfP-Problemstellungen angewandt wurde (Anderson et al., 2011 and Grohmann et al., 2023).

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in enger Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt. Alle verwendeten Testdatensätze wurden durch die BAM zur Verfügung gestellt. Zudem erfolgten regelmäßige Arbeitstreffen in Berlin und Freiberg, die besonders zum Projektfortschritt beigetragen haben. Hierbei wurden der aktuelle Stand diskutiert, Datensätze besprochen und Publikationen vorbereitet. Aufgetretene Schwierigkeiten und Missverständnisse bzgl. der realen Datensätze konnten so effektiv eliminiert werden. Zwischenergebnisse wurden außerdem in internen Arbeitsgruppentreffen einem Fachpublikum vorgestellt.

Zu den bearbeiteten Datensätzen zählt auch eine Messung an einem Probekörper der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), von dem sich die Gesellschaft Erkenntnisse über den Verschluss potenzieller Endlager erhofft. Der Verarbeitung und Publikation der Daten ist seitens der BGE freigegeben.

5. Versuchseinrichtungen / Analytische Verfahren

Alle für die Aufzeichnung der Ultraschalldaten benötigten Probekörper, Instrumente und sonstige Infrastruktur wurden durch die BAM zur Verfügung gestellt. Hierzu zählen insbesondere 2D und 3D Messgeräte für die Datenakquise an den Probekörpern und Großversuchen.

Für die Softwaretests sowie die Datenauswertung wurde Rechentechnik der TU Bergakademie Freiberg genutzt. Kleinere synthetische Experimente konnten auf institutseigenen Servern ausgeführt werden. Aufgaben mit größerem rechentechnischem Aufwand wurden auf dem High Performance Computing Cluster des Universitätsrechenzentrums der TU Bergakademie Freiberg ausgeführt.

6. Durchführung der Untersuchungen/Ablauf der Experimente bzw. Analysen

Zu Beginn des Projekts erfolgte eine umfassende Einarbeitung in die Thematik inkl. Literaturstudium hinsichtlich der fokussierenden seismischen Migrationsverfahren und etablierter Ultraschall-Abbildungsverfahren. Diese Einarbeitung umfasste auch das vertraut machen mit dem Quellcode der an der TU Bergakademie entwickelten Abbildungsverfahren sowie ihrer genauen Funktionsweise.

Auf dieser Basis konnte ein Konzept für eine Software erarbeitet werden, die akustische und elastische Daten, d.h. Ultraschall- oder seismische Daten, unabhängig von der Größenordnung des Untersuchungsobjektes bearbeitet. Die Implementierung dieser Software erfolgte schrittweise, beginnend mit der Kirchhoff-Migration und gefolgt von Erweiterungen für die Kohärenzmigration und der Fresnel-Volumen-Migration. Jede Erweiterung wurde mit einem kleinen, synthetischen Modell auf ihre Funktion getestet. So entstand ein modulares Softwarepaket, welches jederzeit erweiterbar und skalierbar ist. Abschließend wurde eine Möglichkeit eingebaut, um die Berechnung des Abbildes parallel auf mehrkernigen Rechnern ausführen zu können. Die Software-Adaption war nicht mit dem Arbeitspaket abgeschlossen, sondern wurde nahezu über den gesamten Projektzeitraum weitergeführt, da jeder neue Datensatz auch neue Herausforderungen enthielt oder bei Projekttreffen diskutierte Erweiterungen diskutiert wurden, die eine Anpassung nötig gemacht haben.

Die ersten umfangreichen Tests des Softwarepakets erfolgten an synthetischen Datensätzen, welche mit einem Simulationsprogramm für Wellenfelder mit Finiten Differenzen erzeugt wurden (Zehner et al., 2016). Systematische Tests wurden dabei mit einem kleinen Modell durchgeführt, welches verschiedene Materialparameter sowie Reflektoren mit unterschiedlichen Neigungen enthält. Um die Performance der Software zu testen und auch Qualitätsunterschiede zu anderen Abbildungsverfahren feststellen zu können, wurde auch ein sehr großes, realistisches Modell bearbeitet, welches einem untertägigen Verschlussbauwerk nachempfunden ist.

Nach den erfolgreichen synthetischen Tests stellte die BAM mehrere reale Datensätze mit Bezug zur kerntechnischen Sicherheit zur Verfügung. Diese wurden bearbeitet, die Ergebnisse diskutiert und anschließend auf dem jährlichen Research Symposium der American Society of Nondestructive Testing in den Vereinigten Staaten präsentiert. Die zugehörige Publikation ist öffentlich und im zugehörigen Tagungsband zu finden (Büttner et al., 2023).

Ein weiterer Datensatz wurde gegen Projektende bearbeitet. Dabei handelt es sich um Daten von einem weiteren untertägigen Großversuch, bei dem echte 3D Daten an der Oberfläche einer komplexen Struktur erhoben wurden. Da konventionelle Abbildungsverfahren hier an ihre Grenzen stießen, wurde dies zum Anlass genommen, das gesamte Softwarepaket um die

Möglichkeit zur 3D Berechnung zu erweitern. Die daraus erzielten Ergebnisse werden derzeit in einer Publikation verarbeitet.

7. Erzielte Ergebnisse

Aus dem Arbeitspaket „Software-Adaption“ resultiert ein Softwarepaket, welches in der Lage ist, Ultraschallecho-Daten aus dem Bauwesen mittels fokussierender seismischer Migrationsverfahren zu verarbeiten und ein Abbild zu berechnen. Dieses Softwarepaket wurde während der gesamten Projektlaufzeit stets weiterentwickelt und bildet damit die Grundlage für die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse.

Erste synthetische Modellstudien demonstrieren die Anwendbarkeit der fokussierenden Verfahren auf Ultraschallecho-Daten. Abb. 1 („Velocity Model“) zeigt ein Testmodell, auf dessen Grundlage ein synthetischer Datensatz generiert wurde. Hierfür wurden Ultraschallquellen und -empfänger an der Oberfläche des Geschwindigkeitsmodells angenommen. Das Ergebnis einer konventionellen Auswertetechnik mit als konstant angenommener Hintergrundgeschwindigkeit ist in Abb. 1 („SAFT“) dargestellt. Diese ist von einer Vielzahl an Artefakten sowie stark verzerrten Reflektoren geprägt. Die Abbildungen 1 „KPSDM“ (Kirchhoff-Migration), "FVM" (Fresnel-Volumen-Migration), "CM" (Kohärenzmigration) und "CBFVM" (kohärenzbasierte Fresnel-Volumen-Migration) zeigen eindrucksvoll, wie die Anzahl der Artefakte sowie das Migrationsrauschen durch die Anwendung der fokussierenden Migrationsverfahren reduziert werden.

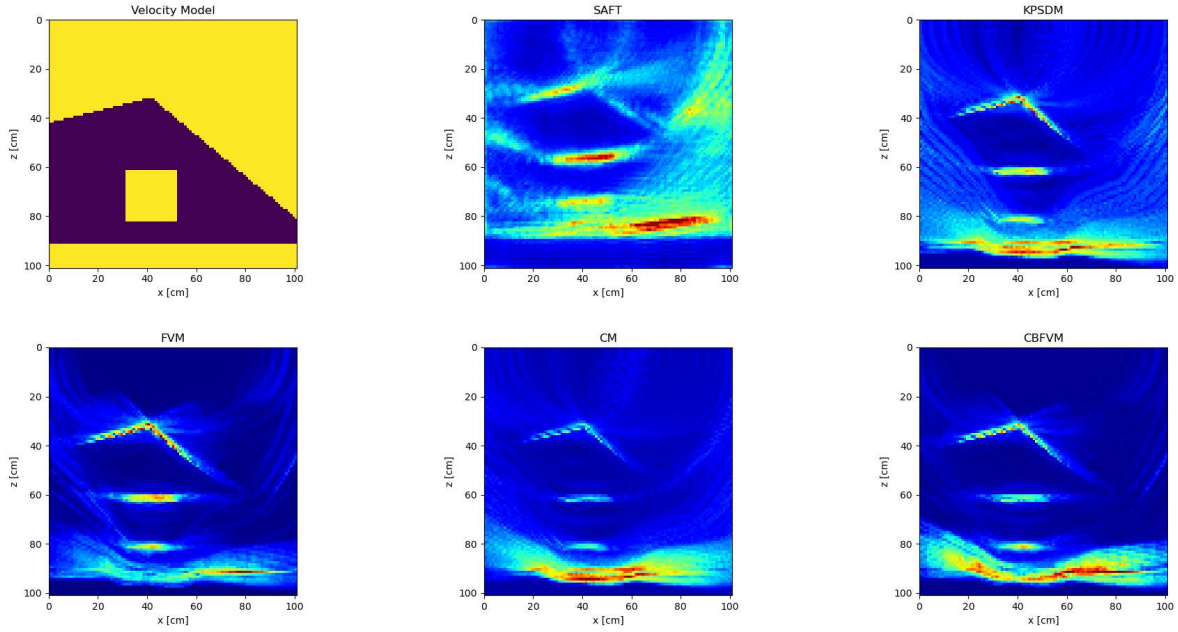

Abbildung 1: Synthetische Modellstudie mit einem einfachen Geschwindigkeitsmodell sowie den zugehörigen Abbildungsergebnissen etablierter und fokussierender Verfahren.

Als reales Datenbeispiel für den zweidimensionalen Fall wurden Ultraschalldaten von einem Großversuch/Verschlussbauwerk aus der Grube Teutschenthal (BGE) verwendet. Auch hier wurden alle genannten Abbildungsverfahren angewandt (Abb. 2). Auch hier zeigt sich bei der Anwendung fokussierender Verfahren ein höherer Detailgrad. Dies trifft insbesondere auf den Vergleich von Kirchhoff-Migration (KPSDM) mit der (kohärenzbasierten) Fresnel-Volumen-Migration zu (FVM und CBFVM). Der Vergleich mit klassischen Auswertemethoden (vgl. SAFT) zeigt, dass insbesondere tiefliegende Reflektoren im Rauschen bisher untergingen. Diese werden von den fokussierenden Verfahren erheblich besser aufgelöst. Zudem sind oberflächennahe Reflektoren im SAFT-Ergebnis lediglich als Indikation ohne Einfallsrichtung zu erkennen, was eine Größenabschätzung erschwert. Die fokussierenden Methoden zeigen dagegen unterschiedlich große Reflektoren mit verschiedenen Neigungen im Probekörper.

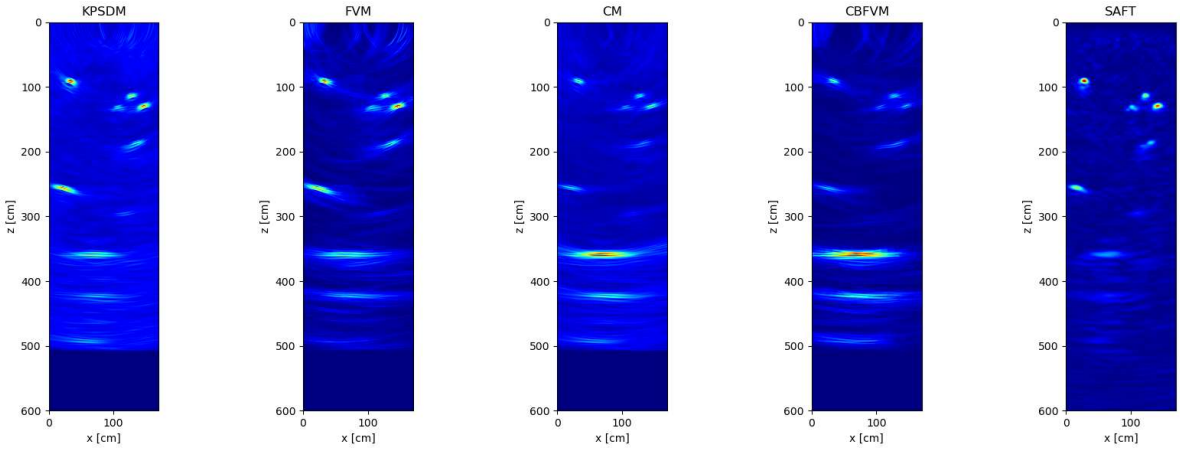

Abbildung 2: 2D Abbildungsergebnisse eines realen Datensatzes. Die Daten stammen von einem Salzbeton-Verschlussbauwerk in der Grube Teutschenthal (BGE).

Ein weiteres Datenbeispiel stammt von einem anderen untertägigen Großversuch, bei dem ein Probekörper aus mehreren Schichten Spritzbeton hergestellt wurde. Dieser Körper wurde mit Fehlstellen versehen, um das Auflösungsvermögen verschiedener Messgeräte und Abbildungsverfahren zu testen. Bei dem Datensatz handelt es sich um einen echten 3D-Datensatz. In Abb. 3 werden Kirchhoff-Migration und kohärenzbasierte Fresnel-Volumen-Migration anhand einiger Schnitte durch das Volumen verglichen. Analog zu den vorhergehenden Beispielen zeigt sich eine erhebliche Reduzierung von Rauschen und Artefakten durch die Verwendung des fokussierenden Verfahrens.

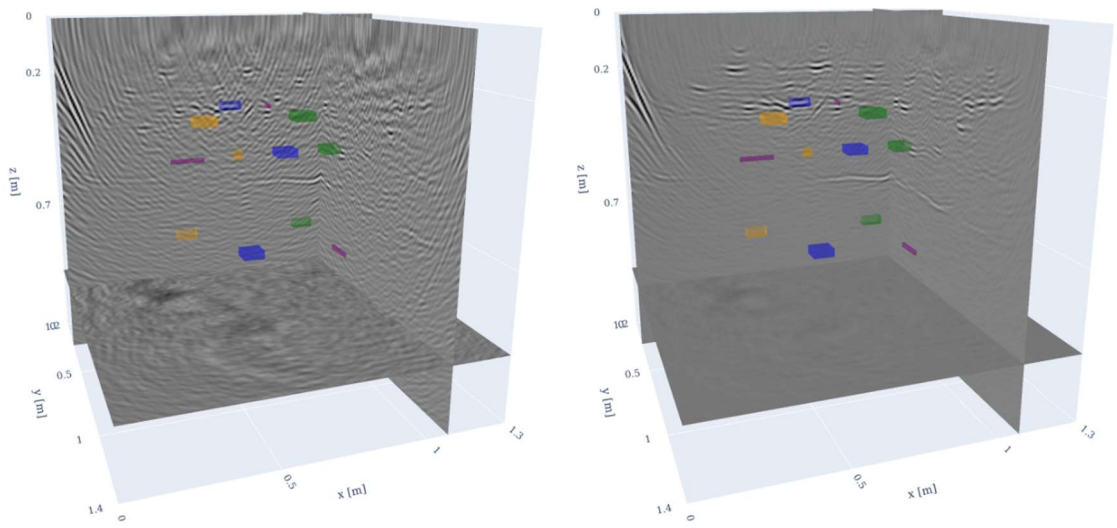

Abbildung 3: 3D-Datenbeispiel aus einem Spritzbeton-Versuch. Links: Kirchhoff-Migration, Rechts: Fresnel-Volumen-Migration. Einbauteile sind als farblich markierte Quader eingezeichnet.

8. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Forschungsgebiet

Während der Projektdurchführung wurden durch andere Arbeitsgruppen regelmäßig neue bzw. modifizierte Abbildungsverfahren für Ultraschalldaten getestet. Es ist jedoch nicht bekannt, dass die hier behandelten fokussierenden seismischen Abbildungsverfahren an anderer Stelle auf ZfP-Daten angewandt wurden.

9. Verweis auf eigene öffentliche Berichte

Im Projektzeitraum wurden halbjährlich Berichte in deutscher Sprache angefertigt. Zusätzlich existieren Jahresberichte in englischer Sprache. Diese werden vom Projektträger verwahrt.

10. Zusammenfassung

Die Arbeiten im Rahmen des Ultrafokus-Projekts haben gezeigt, dass die genannten fokussierenden seismischen Abbildungsverfahren sehr gut auf Ultraschalldaten anwendbar sind und hochauflösende, rauscharme Ergebnisse produzieren. Dies bezieht sich sowohl auf die Anwendung mit Testlinien (2D), als auch auf komplexe 3D-Fälle. Ein weiteres Resultat des Projekts ist ein Softwarepaket, welches die Anwendung der Verfahren auf zukünftige Datensätze erleichtert. Die Ergebnisse wurden und werden internationalem Fachpublikum präsentiert.

11. Quellen

ANDERSON, Brian E., et al. Experimental implementation of reverse time migration for nondestructive evaluation applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129. Jg., Nr. 1, S. EL8-EL14.

BUSKE, Stefan; GUTJAHR, Stine; SICK, Christof. Fresnel volume migration of single-component seismic data. *Geophysics*, 2009, 74. Jg., Nr. 6, S. WCA47-WCA55.

BÜTTNER, Christoph; LAY, Vera; BUSKE, Stefan; NIEDERLEITHINGER, Ernst. Focusing Imaging Methods Applied to Ultrasound Data in the Context of Nuclear Safety. *Proceedings of the 31st ASNT Research Symposium*, 2023.

GROHMANN, Maria, et al. Application of elastic P-SV reverse time migration to synthetic ultrasonic echo data from concrete members. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42. Jg., Nr. 3, S. 73.

HLOUŠEK, F.; HELLWIG, O.; BUSKE, S. Improved structural characterization of the Earth's crust at the German Continental Deep Drilling Site using advanced seismic imaging techniques. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120. Jg., Nr. 10, S. 6943-6959.

SCHNEIDER, William A. Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*, 1978, 43. Jg., Nr. 1, S. 49-76.

ZEHNER, Björn, et al. Rasterizing geological models for parallel finite difference simulation using seismic simulation as an example. *Computers & geosciences*, 2016, 86. Jg., S. 83-91.